科技与社会
S & T and Society

引用格式：龙吉生, 杜海亮, 邹昕, 等. 关于城市生活垃圾处理碳减排的系统研究. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1143-1153.
Long J S, Du H L, Zou X, et al. Systematic study on carbon emission reduction of municipal solid waste treatment. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1143-1153. (in Chinese)

关于城市生活垃圾处理碳减排的系统研究

龙吉生* 杜海亮 邹 昕 黄静颖

上海康恒环境股份有限公司 上海 201703

摘要 在中国碳达峰、碳中和背景下，城市生活垃圾处理面临低碳减排的新挑战。文章提出在垃圾分类模式下，依托静脉产业园建设，通过各固废单元的协同处理，实现物质和能量双循环，减碳效益显著。结果表明：2020 年全国城市生活垃圾的焚烧和填埋处理共减少 518 万吨 CO_2；同年，若湿垃圾在静脉产业园协同处理，比单独处理减少 1 500 万吨 CO_2。垃圾焚烧发电厂作为静脉产业园核心项目，采用炉排大型化、高参数设计、热电联产等技术全年可减少 90 万—500 万吨 CO_2。建议多源城市固废采用静脉产业园模式进行协同处置，实现减碳效益最大化。同时，响应国家"一带一路"倡议，推荐应用在东南亚等地区的发展中国家，为全球固废处理的碳减排贡献中国方案。

关键词 碳中和，碳减排，垃圾焚烧，协同处理，静脉产业园

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220325001

近年来，随着世界经济快速发展，全球生活垃圾产生量年年攀升。世界银行预测，到 2050 年，全球生活垃圾年产生量将达 34 亿吨[1]，较 2016 年将增长约 70%（图 1）。中国作为世界第二大经济体，在 2020 年仅城市生活垃圾清运量已达 2.35 亿吨，相比 2010 年，近 10 年间增长了约 49%[2]。经济高速发展遭遇垃圾围城的困境，生活垃圾的减量化、资源化和无害化处理受到广泛关注。

各国对城市生活垃圾处理主要有回收、填埋和焚烧等方式。其中，焚烧处理在发达国家应用最为广泛。2018 年，欧盟 28 国生活垃圾焚烧处理比例达 26.6%[3]，而在日本，2019 年可燃垃圾几乎 100% 通过焚烧的方式被处理[4]。

我国的生活垃圾焚烧行业也经历了从无到有的过程。2000 年前，由于缺乏垃圾焚烧设备制造技术、设计、运行经验和相关政策、标准，我国绝大部分城市主要以填埋方式处理生活垃圾。自 2000 年城市生活垃圾焚烧处理成套设备被列入《关于公布<当前国

*通信作者
资助项目：国家重点研发计划固废资源化专项（2020YFC1910100）
修改稿收到日期：2022年6月28日

家鼓励发展的环保产业设备(产品)目录>（第一批）的通知》起，我国垃圾焚烧处理行业迎来发展机遇。2011 年发布的《关于进一步加强城市生活垃圾处理工作意见的通知》中进一步明确了国家大力推广垃圾焚烧发电技术，到 2020 年，我国已经形成以焚烧为主的生活垃圾处理方式（图 2）。

垃圾焚烧发电替代垃圾填埋，降低了温室气体（甲烷）排放，具有碳减排效益。2004—2020 年，随着我国垃圾焚烧处理量的迅速增加，垃圾处理碳排放量逐年递减（图 2）。至 2030 年预测垃圾处理碳排放量为 −4 256 万吨 $CO_2$①，碳减排效益明显。

综上，在碳中和背景下，本文将对我国现有城市生活垃圾处理现状进行系统的分析与思考，并提出生活垃圾处理行业节能减排降碳关键技术与模式，为《园区碳达峰碳中和实施路径专项报告》②等促进行业碳减排发展的报告和政策编制提供借鉴与参考。

1 基于垃圾分类的城市生活垃圾处理全过程碳减排分析

1.1 垃圾分类方式

随着垃圾分类普遍推行，各地垃圾分类方式多样，有二分法、三分法、四分法和五分法等，其中四分法为主流分类方式。以上海为例，生活垃圾被分为可回收物、有害垃圾、湿垃圾和干垃圾 4 类。同时建立分类投放、分类收集、分类运输和分类处理的垃圾处理系统。

然而，四分法在实施过程中仍存在诸多问题：① 前端居民分类投放缺乏有效管理和监督；② 在收运

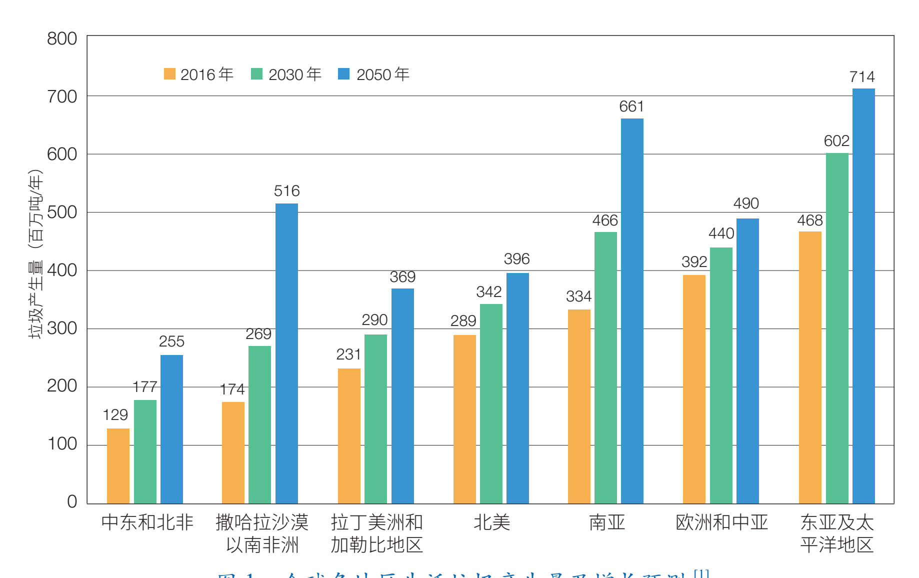


图 1 全球各地区生活垃圾产生量及增长预测 [1]

Figure 1 Municipal solid waste (MSW) production and growth forecast in various regions of the world[1]

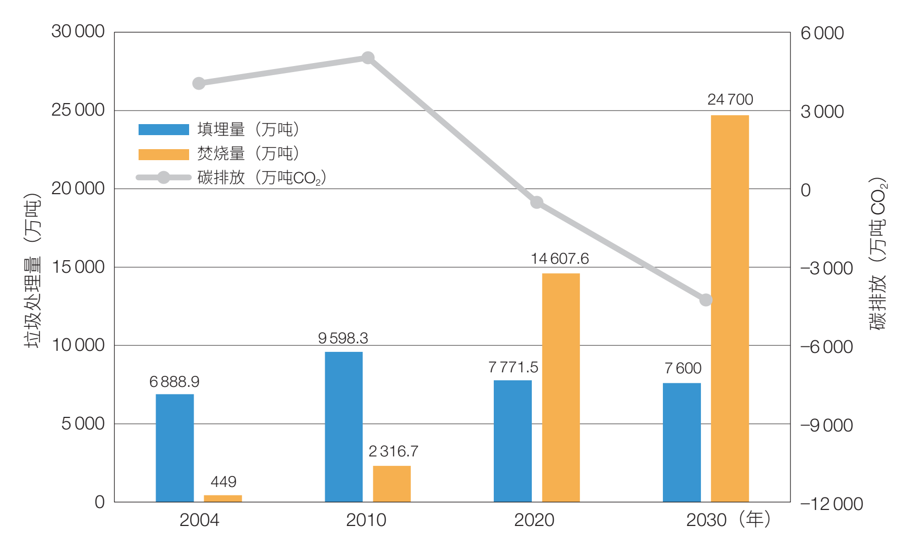


图 2 中国生活垃圾填埋处理量与焚烧处理量及碳排放统计数据

Figure 2 Statistics of landfill, MSW incineration and carbon emission in China

数据来源：国家统计局（https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C06&sj=2021）

Data source: National Bureau of Statistics (https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C06&sj=2021)

① 填埋排放系数为 0.61 吨 CO_2/ 吨垃圾，数据来源于《中国产品全生命周期温室气体排放系数集 2022》（http://lca.cityghg.com）；焚烧排放系数为 − 0.36 吨 CO_2/ 吨垃圾，数据来源于 114 个中国核证自愿减排量（CCER）审定项目统计。

② 生态环境部科技与财务司 . 关于报送 2021 年国家生态工业示范园区建设评价报告的通知 . (2022-03-23)[2022-07-14]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbsh/202203/t20220323_972357.html.

环节，存在前端分类但后续混运，或统收统运等打击民众积极性的问题；③ 前端若未分出不可燃物，在处理环节则将使得焚烧发电厂投资大、耗能多；④ 湿垃圾处理厂长期稳定运行待验证，大量的剩余可燃物仍要焚烧处理，渗沥液（沼液）多且难处理。

针对上述问题，结合国外成功案例和中国国情，本文对3种典型垃圾分类模式进行研究分析（图3）。模式1为现行四分法，模式2将四分法干垃圾中不可燃部分单独分出，模式3将干垃圾和湿垃圾根据能否燃烧分为可燃垃圾和不可燃垃圾，其中滤水后厨余为可燃垃圾。

1.2 不同分类模式的全生命周期成本分析

为系统评价不同分类体系综合能效情况，本节以全生命周期视角针对干湿（模式1）、干湿不可燃（模式2）、可燃不可燃（模式3）等分类模式进行综合能效对比分析。垃圾全生命周期包括垃圾分类投放、分类收集、分类运输、分类处理和资源回收等环节设计。

以1 000吨/日的生活垃圾处理量为例，对不同分类模式垃圾组分及收运设备的折旧年限进行了如表1所示的假设，运用生命周期评价法（life cycle assessment， LCA）法对3种分类模式的输入、输出物质及全生命周期成本进行分析。成本包括湿垃圾处理厂及焚烧厂运营成本、收运成本、融资成本；收入包括电力、油脂、炉渣。在3种模式中，干垃圾/可燃垃圾进行焚烧发电，净化工艺包括烟气净化、废水处理、飞灰螯合等，炉渣外送出售；湿垃圾处理包括餐厨处理和厨余处理、产生渗沥液产沼发电、油脂回收出售、废渣入炉焚烧、处理系统所需用电及蒸汽来源于焚烧系统；不可燃垃圾进行填埋处理。

对表1的测算结果如表2所示，在输入/输出方面，模式3加强了厨余滤水，垃圾收运过程中的渗沥液产量减少约60吨/日；同时，模式3的发电效率最高，约为32.06万度/日。在全过程成本方面，模式1、模式2和模式3全过程成本依次降低，模式3的总成本最低，约为387.7元/吨。相比模式1、模式2，模式3的经济环境效益更加显著：① 渗沥液产量减少，收运处理环节的臭气问题将得到极大解决；② 垃圾热值提高，配置高参数焚烧发电技术，燃烧更充分，可降低烟气初始浓度，极大降低二次污染控制方面的压力；③ 可减少惰性物质进入收运处理环节，避免不可燃垃圾进入焚烧系统带来的热损失；④ 较低的全过程成本有利于减轻垃圾处理的财政压力，便于垃圾处理收费政策的实施。

1.3 生活垃圾分类末端处理的碳减排分析

本文应用《中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2022年）》排放系数，参考丹麦大学开发的EASEWASTE/EASETECH模型分析方法对生活垃圾分类末端处理方式的碳减排效益进行比较分析。结果表明，在填埋为主、沼气部分回收发电的情景下排放当量为0.61吨CO_2/吨垃圾；在焚烧为主、灰渣填埋的情景下排放当量为–0.12吨CO_2/吨垃圾，相比填埋处置，垃圾焚烧发电碳减排效益显著；当垃圾按干湿分类后，采取厨余垃圾厌氧发酵、可燃垃圾焚烧、其他垃圾填埋处理的组合处理方

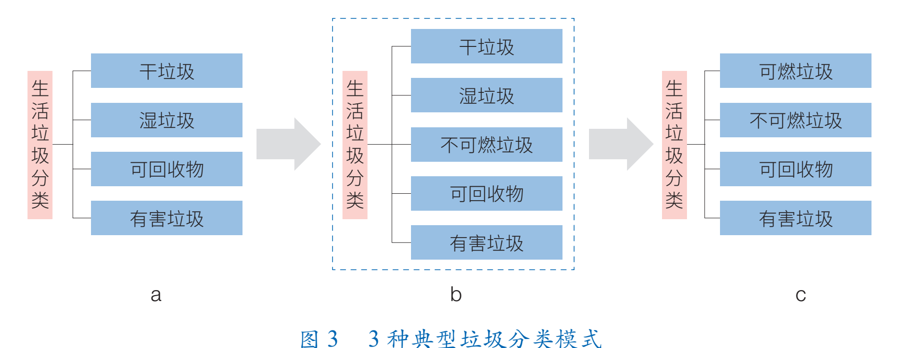


图3　3种典型垃圾分类模式

Figure 3　Three typical waste classification modes

(a) 模式1：干+湿；(b) 模式2：干+湿+不可燃；(c) 模式3：可燃+不可燃

(a) Mode 1: Dry-wet wet quartering method; (b) Mode 2: Dry-wet-noncombustible quintile method; (c) Mode 3: Combustible-noncombustible quartering method

表1 生活垃圾分类模式的基础条件

Table 1 Basic scenarios for MSW classification modes

项目		单位数值	干+湿	干+湿+不可燃	可燃+不可燃	备注
			数值	数值	数值	
垃圾分类	人口	万人	100	100	100	
	每人产生垃圾	千克/日	1	1	1	已扣除可回收物和有害垃圾
	生活垃圾产生规模	吨/日	1 000	1 000	1 000	
	滤出水	吨/日	60	60	120	家庭自行脱水后滤液进入市政管网，可燃不可燃设定滤水效率高
	湿垃圾	吨/日	240	240	/	湿垃圾占总量30%，扣除家庭端滤水后进入处理设施量
	干垃圾	吨/日	700	500	/	
	不可燃垃圾	吨/日	/	200	200	不可燃垃圾占总量的20%
	可燃垃圾	吨/日	/	/	680	
收运	建筑折旧年限	年	28	28	28	
	机械车辆折旧年限	年	8	8	8	
	垃圾桶折旧年限	年	2	2	2	
	收运频次	车次/日	1	1	1	收运距离按照一般城市直运距离（35 千米）计算

式，该情景下排放当量为–0.068 吨 CO_2/吨垃圾，较之混合垃圾焚烧，碳减排效益反而有所下降。同时，对垃圾分类的可回收物进行回收利用，碳减排效益明显。以塑料为例，虽然在回收过程中会产生碳排放，但是回收利用后带来的排放当量为–0.24 吨 CO_2/吨垃圾。提高可回收物的回收利用比例，可大大减少碳排放。

由此看来，垃圾分类带来的碳减排效益主要是可回收物的回收利用和垃圾焚烧发电替代填埋。因此，在垃圾分类模式下，垃圾焚烧发电厂高效低碳运行意义重大。

2 高效低碳垃圾焚烧发电厂的建设与运营

2.1 生活垃圾焚烧厂碳减排分析与思考

生活垃圾中的碳源分为生物碳源和化石碳源两部分，采用焚烧处置时，生物碳源的排放仅参与大气碳循环，其排放系数为 0 [5]，因此焚烧的碳排放主要来源于垃圾中化石碳燃烧。垃圾焚烧发电替代垃圾填埋，降低了温室气体（CH_4 等）排放，同时垃圾焚烧发电可替代传统火电发电，具有潜在的碳减排属性[6,7]。

生活垃圾焚烧厂碳减排分析采用的 CCER 方法学为：CM-072-V01，多选垃圾处理方式[8]。

生活垃圾焚烧厂减排量计算公式如下：

$$ER_y=BE_y-PE_y-LE_y \quad (1)$$

其中，ER_y 为减排量（吨 CO_2）；BE_y 为基准线排放（吨 CO_2）；PE_y 为项目排放（吨 CO_2）；LE_y为泄漏排放（吨 CO_2）。其中，基准线排放包括生活垃圾进入填埋场产生的排放、火力发电产生的排放及其他方式供热产生的排放；项目排放量包括生活垃圾焚烧化石碳源产生的排放、渗沥液处理过程中产生的排放及添加辅助燃料产生的排放。生活垃圾焚烧厂不考虑泄露排放。

随着垃圾分类实施，焚烧厂入炉生物碳比例减少，化石碳比例增加，使得焚烧厂碳排放量增加。除此，我国现行《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》

表2　生活垃圾分类模式对比表（以1 000吨/日为例）

Table 2　Comparison of MSW classification modes (taking 1 000 t/d as an example)

项目		单位数值	干+湿	干+湿+不可燃	可燃+不可燃	备注
			数值	数值	数值	
输入	处理规模	吨/日	1 000	1 000	1 000	
	渗沥液	吨/日	60	60	120	家庭自行脱水后滤液进入市政管网处理
	焚烧	吨/日	756.28	556.28	680	入炉量，包含湿垃圾处理后的沼渣部分
	湿垃圾	吨/日	240	240		湿垃圾厌氧产沼
输出	焚烧发电	万度/日	30.16	30.81	32.06	上网电量
	沼气发电	万度/日	1.61	1.61		
	烟气	万标方/日	333.68	328.86	346.27	
	炉渣+不可燃垃圾	吨/日	173.40	39.77 +200	27.2+200	炉渣售价10元/吨；不可燃垃圾资源化，成本收益抵消
	飞灰	吨/日	30.25	22.25	27.2	处理成本1 500元/吨
经济效益	收运成本	元/吨	168.34	155.32	142.39	含融资成本
	处理成本	元/吨	336.43	291.10	245.31	含融资成本
	吨总成本	元/吨	504.77	446.42	387.70	
	吨总收入	元/吨	180.06	171.49	184.72	不含政府补贴
	收运成本相比	元/吨	+26（18.23%）	+13（9.09%）		
	处理成本相比	元/吨	+91（37.14%）	+46（18.66%）	比较基准	
	吨总成本相比	元/吨	+117（30.20%）	+59（15.15%）		

（GB50869-2013）未对导排填埋气强制性要求集中燃烧或利用，在CCER方法学计算基准中，该法规下填埋气回收率f_y取0；而实际上，我国目前受控较好的厌氧填埋场沼气收集率在60%—80%之间[9,10]，因此若将来标准对f_y根据实际排放数据修订，则填埋场实际排放入大气中的温室气体量大大降低。另外，随着火电行业技术改进，区域碳排放强度基准线也有所下调。

面对以上3种变化，生活垃圾焚烧厂碳减排面临新的挑战，因此在碳中和背景下，焚烧厂应不断探索更优的技术促进低碳排放，其中包括炉排大型化、提高热利用效率及发电效率等。

2.2 提高焚烧炉单炉垃圾处理规模

炉排炉处理规模增加可提高单炉垃圾处理能力，降低项目投资、运行及维护成本，同时提高锅炉热效率和吨垃圾发电量，实现经济及减碳效益的双赢[11,12]。

选取国内15座已投运垃圾焚烧厂，其中1座单炉规模250吨/日，6座单炉规模600吨/日，7座单炉规模750吨/日，1座单炉规模800吨/日，采用CCER方法学计算案例焚烧厂碳减排量并取平均值[8,13,14]，单炉规模800吨/日较250吨/日减排量增加0.08吨CO_2/吨垃圾（图4）。截至2020年1月，全国700吨/日以上炉排台数178台，处理能力约13.4万吨/日；800吨/日以上炉排台数26台，处理能力约4.2万吨/日。假如750吨/日炉排改造使用800吨/日炉排，则年碳减排量可增加约90万吨。此外，我国700吨/日以下炉排约近1 000台，若后续改造采用大型化炉排，年碳减排量将达数百万吨。

2.3 采用高参数与蒸汽再热技术

国内常规生活垃圾焚烧厂发电效率约为22%，提高发电效率可增加生活垃圾焚烧厂吨垃圾碳减排效益，而采用高参数、中间再热技术是目前高效发电发展方向之一。取不同蒸汽参数设计值基于CCER方法学对某项目碳减排量进行计算（图5）[8,13,14]，采用次高压中温参数6.4 MPa/450℃较常规中压中温参数4 MPa/400℃吨垃圾发电量提高16.3%，发电效率上升明显，碳减排量增加近0.04吨CO_2/吨垃圾。

由上文分析可知，垃圾焚烧发电采用更高参数并结合再热技术则可以进一步提高发电效率，进而提高吨垃圾碳减排效益。高参数再热技术在欧洲有部分项目应用，例如德国Rüdersdorf焚烧厂使用炉内再热技术后发电效率达到29.9%，主蒸汽参数9 MPa/420℃；荷兰阿姆斯特丹AEB焚烧厂采用炉外再热技术发电效率达到30%以上，主蒸汽参数为13.0 MPa/440℃[15]。康恒环境河北三河项目采用了首台国产千吨大炉排以及全球首台中温超高压蒸汽、炉外除湿耦合再热双缸汽轮发电机组，主蒸汽参数13.5 MPa/450°C，大炉排、超高参数及炉外再热技术的联合使用使全厂发电效率30%以上，碳减排量增加近0.10吨CO_2/吨垃圾，全厂年碳减排量增加约7.3万吨。2020年中国进厂垃圾焚烧量达1.46亿吨，入炉垃圾量估算约1.17亿吨，我国不同地区入炉吨垃圾发电量分布范围为366—467千瓦时/吨垃圾[12]，假设国内50%以上垃圾焚烧厂采用高参数及蒸汽再热技术，全厂电效率从22%提高至30%，则每年可多发约89亿度电，年碳减排量可增加近500万吨CO_2。

2.4 热电联产提高全厂热利用效率

以某处理规模600吨/日的焚烧厂为例，年垃圾处理量21.9万吨，年渗沥液处理量4.38万吨，年柴油耗量108吨。本项目供热后可替代部分燃气锅炉的供热量，从而减少了燃烧天然气产生的碳排放量。不供热工况下年上网电量0.727亿度，年对外供热量0；供热10吨/小时工况下年上网电量0.567亿度，年对外供热19.6万吉焦；供热20吨/小时工况下年上网电量0.407亿度，年对外供热39.2万吉焦。按照CCER方法学结合热电联产对该厂进行碳排放计算[8,13,14]，不同工况基准线排放量和项目减排量如图6，其中基准线排放量中生活垃圾进入填埋场产生的排放采用10年期平均值。

该厂供热20吨/小时相比不供热工况下碳减排量增加0.02吨CO_2/吨垃圾，该厂年减排量增加4 510吨CO_2。2020年中国垃圾焚烧量达1.46亿吨，若都采用热电联产，则年碳减排量可增加近300多万吨，如能进一步利用汽机乏汽以及烟气余热对外供热，还将产

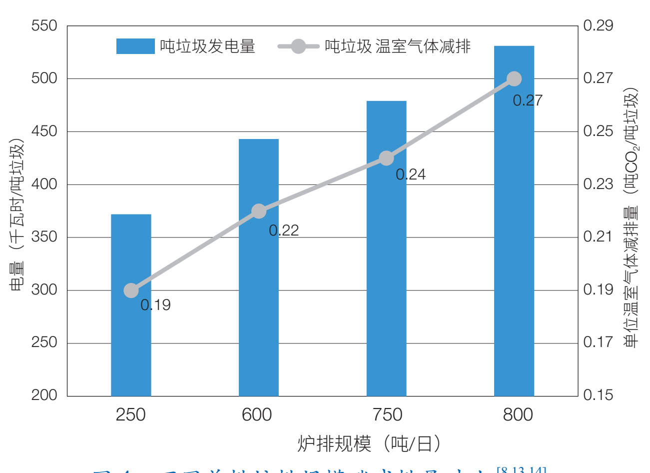


图4 不同单排炉排规模碳减排量对比[8,13,14]

Figure 4 Comparison of carbon emission reduction of different grate scale per line[8,13,14]

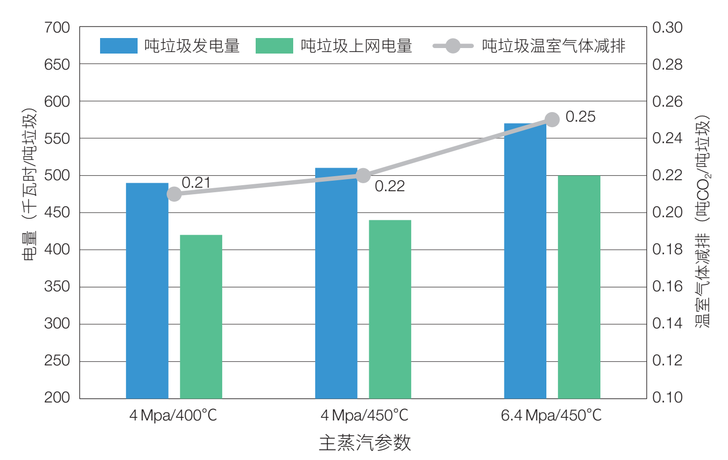


图5 某项目不同蒸汽参数下碳减排量（CCER）[8,13,14]

Figure 5 Carbon emission reduction of a project based on CCER methodology under different steam parameter values[8,13,14]

生更大的碳减排效益。

炉排大型化、高参数、热电联产技术的碳减排效益都十分可观，但在实际应用场景中，三者存在能效的重合性而不可简单叠加。同时，不同技术应用也存在一些客观条件的限制，如炉排设计规模应结合项目所在地垃圾清运量，高参数设计需考虑垃圾热值，热电联产需保证项目周边有稳定热用户等。因此，在建设垃圾焚烧发电设施的前期规划和设计时应综合考虑利用垃圾焚烧发电供热、碳减排等功能，合理统筹优化项目规模设计及周边热源规划，充分提高项目碳减排效益。

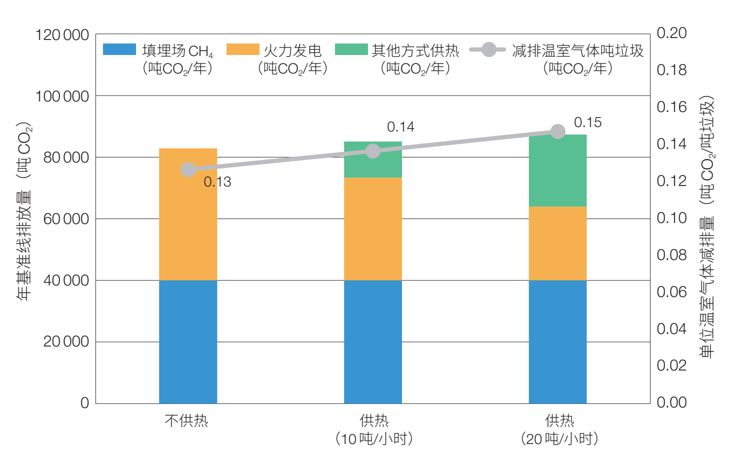


图6 某生活垃圾焚烧厂热电联产基准线碳排放量和碳减排量[8,13,14]

Figure 6 Baseline carbon emission and carbon emission reduction from thermoelectric co-generation of an MSW WtE plant[8,13,14]

3 零碳/负碳静脉产业园区模式研究

3.1 固废单独处理存在的问题

在传统模式中，生活垃圾无害化处理设施、危险废弃物处置设施、工业固废处置设施、电子废弃物回收设施等项目独立运行。在废弃物产量不断增大、环评标准提高、邻避效应等压力下，单独处理项目在选址及环评等方面都承受着巨大压力。同时，单独运行项目在废物的收运、再生利用、最终处置等全过程面临的环境风险较大，污染物控制难度高、成本大，且项目资源利用率及土地利用率很低。

3.2 协同处理实现物质和能量双循环

静脉产业园是以生活垃圾焚烧为核心，集市政污泥、医疗垃圾、餐厨垃圾、厨余垃圾、建筑垃圾、电子垃圾等废弃物一体化处理的新型工业园区（图7）。园区综合考虑各类城市废弃物处理处置的工艺路线、技术衔接、废物交换利用等，对各产业进行包括道路系统及基础设施建设在内的空间合理布局，构建园区整体秩序，在保证环境安全的前提下实现物质与能量双循环，是构建资源节约型、环境友好型社会的有效手段。

以康恒环境珠海静脉产业园为例（图8），生

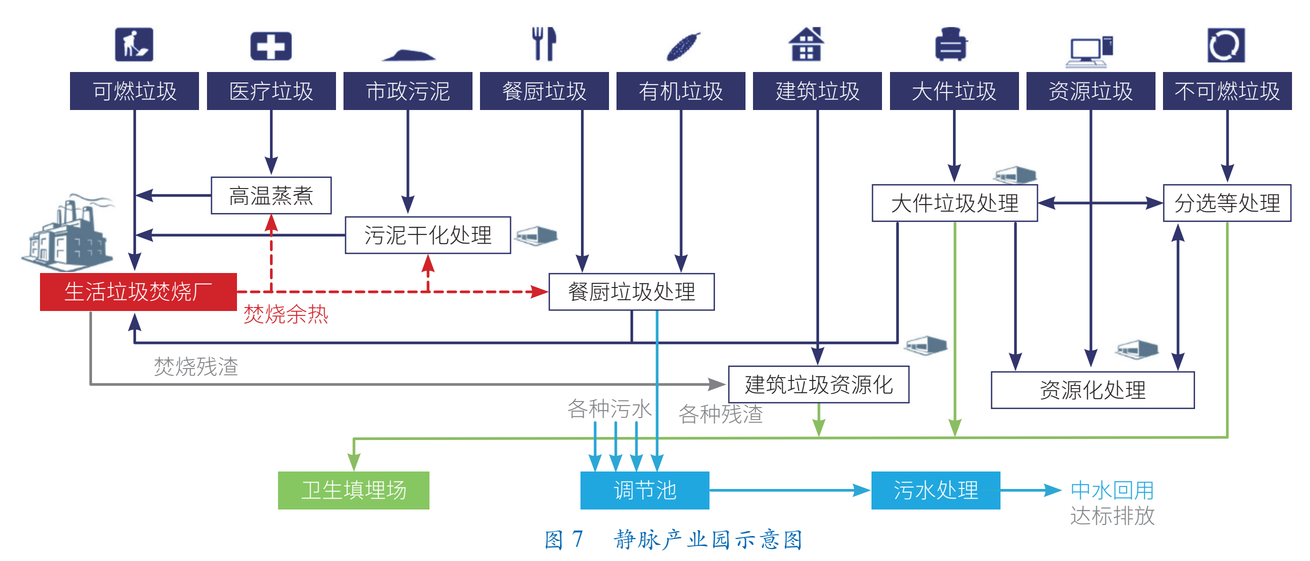


图7 静脉产业园示意图

Figure 7 Schematic diagram of Eco-industrial Park

活垃圾焚烧发电厂是全区的电力供应中心，焚烧产生的蒸汽用于污泥干化、餐厨垃圾厌氧发酵、动物尸体及医疗垃圾的高温蒸煮，同时，焚烧厂还能协同处理厨余、污泥及医疗废物处理后的固渣；厨余垃圾厌氧发酵产生的沼气进入焚烧厂燃烧发电；废水、废热进行回收循环利用。在园区外，焚烧产生的炉渣和建筑垃圾进行资源化再生用于环保建材行业；厨余和动物尸体提炼出的油脂进行出售循环利用。废弃物间的协同处理降低了系统投资和运行费用，促进了循环经济，降低了碳足迹。例如，垃圾焚烧厂向园区内其他单元提供电力和蒸汽，减少这些设施外购电量和蒸汽量，降低运行成本，有效减少温室气体排放。园区年用电量为 0.727 亿度（实现减排约 36 350 吨 CO_2），年用热为 0.255 万吨蒸汽（实现减排约 895 吨 CO_2）。

3.3 静脉产业园碳减排效益——以湿垃圾协同处理为例

本文根据《中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2002年）》选取相应系数，对单独处理和静脉产业园协同处理模式下湿垃圾的碳排放量进行计算对比。在单独处理模式中，厨余垃圾进行厌氧发酵处理，处理后的残渣进行填埋。在协同处理模式中，厨余垃圾厌氧发酵后，厨余残渣进入焚烧厂焚烧。根据表 1 信息，取湿垃圾比例为 24%，厨余垃圾厌氧后固渣占湿垃圾的 40%。

单独处理的碳排放：

$$ER_{IN} = m_k \times \varphi_{AD} + m_{k,residue} \times \varphi_L \qquad (2)$$

协同处置的碳排放：

$$ER_{CO} = m_k \times \varphi_{co} \qquad (3)$$

其中，ER_{IN} 为单独处理时的排放量（吨 CO_2）；m_k 为厨

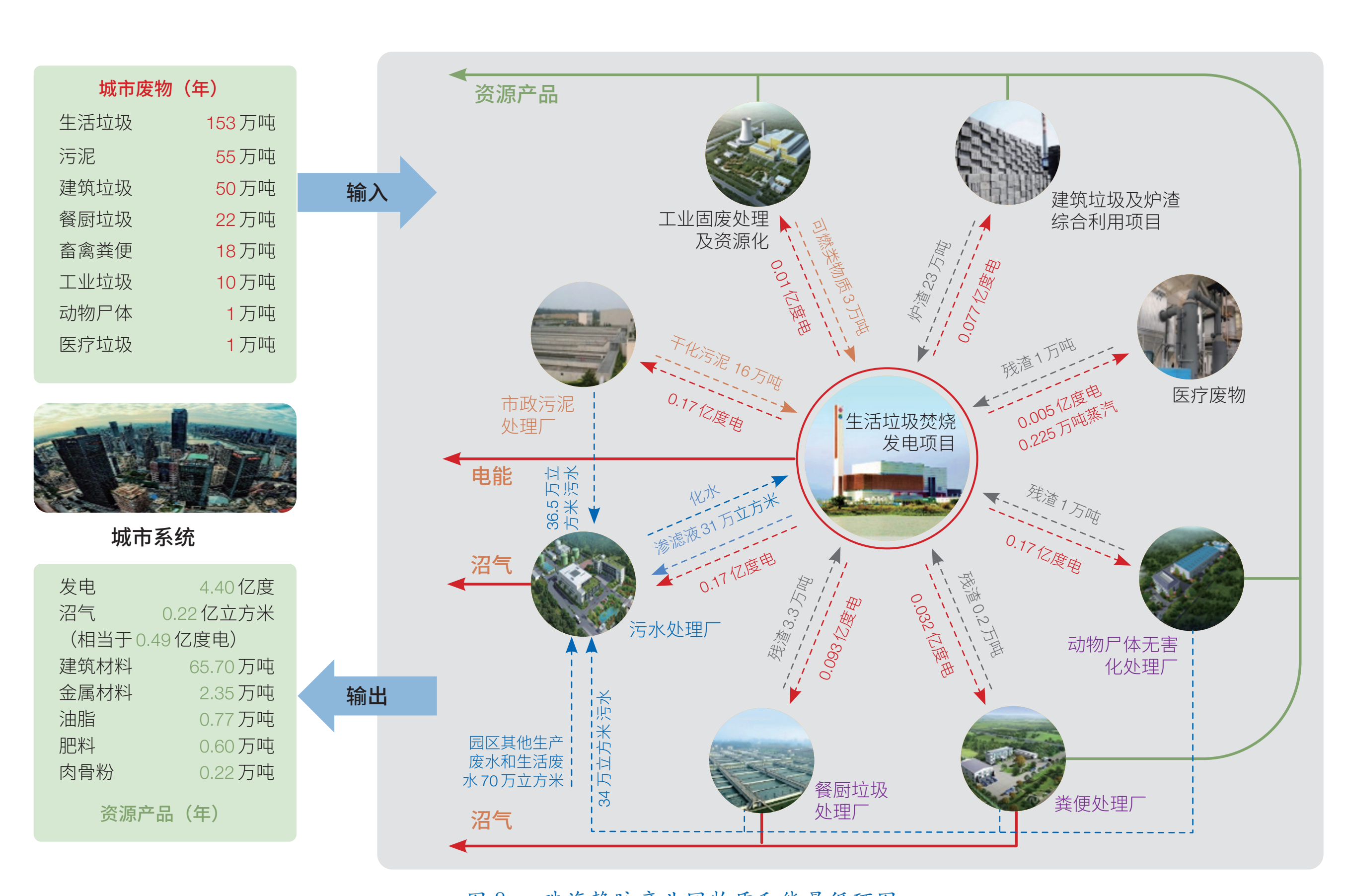


图 8　珠海静脉产业园物质和能量循环图

Figure 8　Mass and energy cycle of Zhuhai Eco-industrial park

余垃圾质量（吨）；φ_{AD} 为厨余垃圾厌氧消化排放系数，取–0.027 吨 CO_2/吨垃圾；$m_{k,residue}$ 为厨余垃圾厌氧消化后的残渣质量（吨）；φ_L 为垃圾填埋排放系数，取0.612 吨 CO_2/吨垃圾；ER_{CO} 为协同处置排放量（吨CO_2）；φ_{co} 为协同处置排放系数，取–0.068 吨 CO_2/吨垃圾。

以 2020 年为例，厨余垃圾总量为 5 371 万吨。

单独处理碳排放：

ER_{IN} =[5 371×（−27.54）+5 371×0.4×612.64]/1 000

=1 165.5 万吨 CO_2。

协同处理碳排放：

ER_{CO} =[5 371×（−67.8）]/1 000=−365.2 万吨 CO_2。

计算结果（图 9）表明，湿垃圾在单独处理时排放为正，厨余垃圾在与焚烧厂进行协同处置时排放为负。若 2020 年全国湿垃圾协同处理后，将减少碳排放 1 500 万吨，2030 年这一数据将超过 2 000 万吨，协同处理的碳减排效益显著。

4 结论与建议

（1）近 20 年来，我国生活垃圾焚烧发电已成主要垃圾无害化处理方式，垃圾焚烧发电替代垃圾填埋，降低温室气体（CH_4）排放，碳减排效益明显。现有方法学测算结果表明，2004 年、2010 年、2020 年、2030 年我国垃圾处理（焚烧+填埋）年 CO_2 排放量分别为 4 041 万吨、5 021 万吨、–518 万吨、–4 256 万吨，垃圾焚烧碳减排潜力巨大。

（2）炉排大型化、高参数、热电联产技术均具有巨大的碳减排效益。在 2020 年焚烧处理规模条件下，应用上述技术后年碳减排量的增加量分别为 90 万、500 万、300 万吨 CO_2，不同技术需结合项目条件因地制宜实施。

（3）静脉产业园模式实现了不同固废单元协同处理，既有利于污染的集中控制，又有利于资源的最大化利用，促进循环经济，减少碳排放。若 2020 年全国湿垃圾均协同处理，将减少碳排放 1 500 万吨 CO_2，2030 年这一数据将超过 2 000 万吨。

（4）建议在垃圾焚烧发电厂的前期规划和设计阶段，垃圾热值和处理量满足条件的情况下，优先提高单炉垃圾处理规模，并采用高参数设计，在提高锅炉热效率和吨垃圾发电量的同时，显著提高项目碳减排效益。

（5）建议充分调研垃圾焚烧发电厂周边热源规划和热用户需求，规划多种形式热能利用方式，如管道供热、移动供热等，应优先利用垃圾焚烧发电厂对周边热用户进行供热，提高项目经济效益与碳减排效益。

（6）建议多源城市固废采用静脉产业园模式进行协同处置，在园区内实现物质与能量双循环，进而实现城市固废处置全过程减碳效益最大化。同时，响应国家“一带一路”倡议，建议在东南亚等发展中国家推广应用，为全球固废处理的碳减排贡献中国方案。

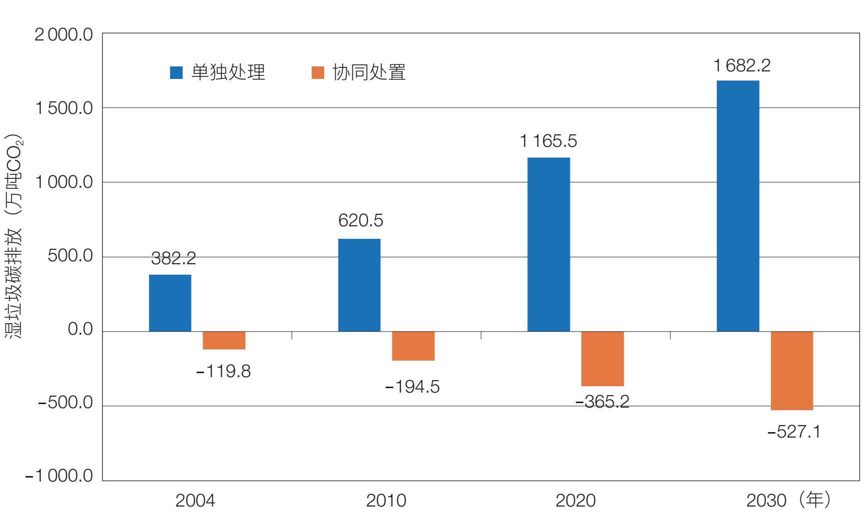


图 9　单独处理与协同处置下的湿垃圾碳排放比较

Figure 9　Comparison of carbon emissions of wet wastes under separate treatment and collaborative treatment

数据来源：国家统计局（https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C06&sj=2021）

Data source: National Bureau of Statistics (https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C06&sj=2021)

参考文献

1 Kaza S, Yao L C, Bhada-Tata P, et al. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington: World Bank, 2018: 3-6.

2 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020年城乡建设统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Ministry of housing and urban rural development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban and rural construction in 2020. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)

3 Eurostat. Municipal waste statistics. (2021-12-01)[2022-07-14]. https://ec.europa. eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment.

4 日本環境省環境再生・資源循環局.日本の廃棄物処理令和元年度版. (2021-03-01)[2022-07-14]. https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/disposal.pdf.
Environmental regeneration of Japan's Ministry of environment, Resource recycling Bureau. Waste treatment in Japan. (2021-03-01)[2022-07-14]. https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/disposal.pdf. (in Japanese)

5 何品晶, 陈淼等. 我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素——以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例. 中国环境科学, 2011, 31(3): 402-407.
He P J, Chen M. Greenhouse gas emissions and influencing factors in the process of domestic waste incineration power generation in China—Taking a municipal solid waste incineration power plant in Shanghai as an example. Chinese Environmental Science, 2011, 31(3): 402-407. (in Chinese)

6 Han H B, Qian G R, Long J S, et al. Comparison of two different ways of landfill gas utilization through greenhouse gas emission reductions analysis and financial analysis. Waste Management & Research, 2009, 27: 922-927.

7 Han H B, Long J S, Li S D, et al. Comparison of green-house gas emission reductions and landfill gas utilization between a landfill system and an incineration system. Waste Management & Research, 2010, 28: 315-321.

8 中国清洁发展机制网. CM-072-V01 多选垃圾处理方式（第一版）. (2014-1-23)[2022-07-12].https://cdm.ccchina.org.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20140123143306450584.pdf.
China Clean Development Mechanism network. CM-072-V01 Multiple waste disposal methods. (2014-1-23)[2022-07-12]. https://cdm.ccchina.org.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20140123143306450584.pdf. (in Chinese)

9 赵超, 赵玲, 陈晓梅, 等. 城市生活垃圾填埋场甲烷收集效率研究. 环境科学学报, 2012, 32(4): 954-959.
Zhao C, Zhao L, Chen X M, et al. Study on methane collection efficiency of municipal solid waste landfill. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 954-959. (in Chinese)

10 陈剑. 上海老港生活垃圾填埋场填埋气快速收集系统应用研究. 北京: 清华大学, 2015.
Chen J. Application of landfill gas rapid collection system in Shanghai Laogang domestic waste landfill. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)

11 龙吉生, 朱晓平, 徐文龙, 等. 大规模生活垃圾高效清洁焚烧关键技术研发及产业化应用. 建设科技, 2021, (13): 28-31.
Long J S, Zhu X P, Xu W L. Research, development and industrial application of key technologies for efficient and clean incineration of large-scale domestic waste. Construction technology, 2021, (13): 28-31. (in Chinese)

12 龙吉生. 生活垃圾焚烧发电厂发电量变化趋势分析. 环境卫生工程, 2020, 28(1): 30-34.
Long J S. Analysis on power generation trend of domestic waste incineration power plant. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(1): 30-34. (in Chinese)

13 Eggleston H S, Buendia L, MiwaK, et al. 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. (2006-06-20)[2022-07-14]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/chinese/vol5.html.

14 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. (2020-12-29)[2022-07-14]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Regional power grid baseline emission factors of

2019 China emission reduction projects. (2020-12-29)[2022-07-14]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml. (in Chinese)

15 施庆燕, 焦学军, 周洪权. 欧洲生活垃圾焚烧发电发展现状. 环境卫生工程, 2010, 6(18): 36-39.

Shi Q Y, Jiao X J, Zhou H Q. Development status of domestic waste incineration power generation in Europe. Environmental Sanitation Engineering, 2010, 6(18): 36-39. (in Chinese)

Systematic Study on Carbon Emission Reduction of Municipal Solid Waste Treatment

LONG Jisheng* DU Hailiang ZOU Xin HUANG Jingying

(Shanghai SUS Environment Co. Ltd., Shanghai 201703, China)

Abstract Under the context of China's carbon peak and carbon neutrality, the treatment of municipal solid waste (MSW) is facing new challenge to reduce carbon emission. This study suggests that significant carbon emission reduction and dual cycle of mass and energy can be realized, under the context of MSW classification, by the collaborative treatment of multi-source solid waste in Eco-Industrial Park. Results showed that in 2020, the incineration and landfilling of MSW in China reduced 5.18 million tons of CO_2 emission, at the same year, 15 million tons of CO_2 emission could have been reduced if the wet waste was treated in Eco-Industrial Park rather than separate treatment. Waste-to-energy (WtE) plant is the core of the Eco-industrial Park, the adoption of larger grate, higher steam parameter, and thermoelectric cogeneration technologies in WtE plant contributes 0.95 million tons of CO_2 reduction, annually. It was suggested that multi-source solid wastes should be treated in the Eco-industrial Park to maximize the benefits of carbon emission reduction. At the same time, in response to the national “one belt one road” initiative, the Eco-industrial Park was recommended to be applied in developing counties in Southeast Asia, contributing China's solutions to the carbon emission reduction of global solid waste treatment.

Keywords carbon neutrality, carbon emission reduction, waste-to-energy, collaborative treatment, Eco-industrial park



龙吉生 上海康恒环境股份有限公司首席科学家，国家重点研发计划“固废资源化”重点专项项目负责人，国务院政府特殊津贴专家，福冈大学客座教授。专注垃圾焚烧发电与污染物控制技术近30年，完成国家及省部级研究课题6项，授权专利86项，发表论文40余篇、参编著作4部。曾获教育部科技进步奖一等奖、华夏建设科学技术奖一等奖，带领团队获得国家科技进步奖二等奖。E-mail: long@shjec.cn

LONG Jisheng The Chief Scientist of Shanghai SUS Environment Co. LTD, the project director of the National Key Research and Development Program of China “Solid Waste Recyling” the expert of special government allowance of the State Council, and the Guest Professor of Fukuoka University. Professionally, he has focused on power generation and pollutant control of waste incineration for nearly 3 decades. Meanwhile, he has completed 6 national and provincial research topics, 86 authorized patents, published more than 40 papers, and participated in the compilation of 4 literary works. Furthermore, he was awarded the First Class Prize of Science and Technology Progress Award of the Ministry of Education, the First Prize of Huaxia Construction Science and Technology Award, led his team to win the Second Prize of National Science and Technology Progress Award. E-mail: long@shjec.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author